

Эволюция и сравнительный анализ методов измерения движений человека

А. В. Жилияков^{1,2}, Е. А. Волокитина^{1,2}, А. А. Жилияков¹

¹ Уральский государственный медицинский университет,
Екатеринбург, Россия

² Екатеринбургский медицинский центр, Екатеринбург, Россия

Введение. Измерение движений играет важную роль в биомеханике, диагностике и спортивной медицине, обеспечивая количественную оценку параметров двигательной активности. Развитие технологий привело к переходу от механических гониометров к цифровым системам с высокой точностью. Инклинометры и фотогониометры повысили воспроизводимость, но оставались экспериментальными инструментами. Внедрение инерциальных датчиков (*англ.* Inertial Measurement Unit, IMU) расширило возможности мониторинга движений вне лабораторий, а маркерные оптические системы стали эталоном точности. Однако их высокая стоимость и барьерность в эксплуатации ограничивают применение в клинике. В последние годы безмаркерные технологии на основе машинного обучения и компьютерного зрения позволяют анализировать движения без сложного оборудования, обеспечивая достаточную точность и снижая затраты.

Цель — систематический обзор и сравнительный анализ методов измерения движений человека, их эволюции, точности и потенциала внедрения в клиническую практику.

Материалы и методы. Для проведения исследования выполнен систематический анализ публикаций в ведущих научных базах данных (PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar). Отбор публикаций осуществлялся согласно критериям PRISMA, что обеспечило включение в обзор только валидных исследований, содержащих сравнительный анализ как минимум двух методов. Анализовались механические, инерционные, оптические маркерные и безмаркерные системы. Основными критериями оценки выступали точность, воспроизводимость, доступность и применимость технологий в различных условиях. Контент-анализ позволил выявить доминирующие тенденции и направления современных исследований в области измерения движений.

Результаты и обсуждение. Современные методы оценки движений человека демонстрируют переход от лабораторных инструментов к мобильным и автоматизированным технологиям. Оптические маркерные системы продолжают использоваться в качестве эталонных методик, обеспечивая наиболее точную 3D-реконструкцию движений, но их сложность и высокая стоимость ограничивают применение в массовой клинической практике. Напротив, безмаркерные технологии, основанные на алгоритмах машинного обучения и компьютерного зрения, демонстрируют значительный прогресс, позволяя осуществлять точный анализ движений без необходимости установки специализированного оборудования.

IMU обеспечивают портативность и возможность длительного мониторинга вне лабораторных условий, однако требуют калибровки и алгоритмов компенсации дрейфа данных, что может снижать точность измерений. Двухмерный видеоанализ и системы с датчиками глубины удобны в использовании, доступны по стоимости, но их точность ограничена при анализе сложных многоплоскостных движений. Сравнительный анализ показал, что безмаркерные технологии при адекватной настройке алгоритмов и контроле за условиями съемки уже достигают уровня точности, достаточного для рутинной клинической практики. Их ключевыми преимуществами являются отсутствие необходимости специализированного оборудования, высокая скорость обработки данных и снижение затрат на диагностику.

Анализ методов оценки движений выявил их ключевые преимущества и технологические ограничения. В частности, гониометры и инклинометры остаются востребованными благодаря простоте, но не обеспечивают точный трехмерный анализ, а инерционные датчики удобны для длительного мониторинга, но требуют алгоритмов фильтрации для устранения погрешностей. Маркерные системы обеспечивают эталонную точность, но их высокая стоимость и сложность ограничивают рутинное применение.

Безмаркерные технологии на основе машинного обучения и компьютерного зрения демонстрируют высокий потенциал для клинического использования, поскольку они автоматизируют анализ движений, уменьшая затраты и упрощая процесс диагностики. Улучшение алгоритмов машинного зрения уже позволило достичь точности, достаточной для клинической диагностики и реабилитации. Внедрение стандартизированных протоколов обработки данных повысит

воспроизводимость и интеграцию этих технологий в медицинскую практику.

Заключение. Эволюция методов оценки движений человека подтверждает переход от лабораторных систем к более доступным и мобильным технологиям. Безмаркерные системы машинного обучения уже демонстрируют достаточную точность для клинической диагностики, снижая стоимость и упрощая интеграцию с цифровыми платформами и персональными мобильными устройствами. Дальнейшее совершенствование алгоритмов и стандартизация процессов позволят расширить их применение в медицине и реабилитации.